
ФИЗИКА ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА / PHYSICS OF CHARGED PARTICLE BEAMS AND ACCELERATION ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.61>**ВТОРИЧНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ СИНУС-350**

Научная статья

Афанасьев К.¹, Гаузштейн В.^{2,*}, Ростов В.³, Синяков А.⁴, Цыганков Р.⁵²ORCID : 0000-0001-9072-0893;^{1, 2, 3, 4, 5}Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (gauzshtein[at]tpu.ru)

Аннотация

В представленной работе проведено исследование вторичного рентгеновского излучения, генерируемого сильноточным импульсно-периодическим ускорителем электронов СИНУС-350. Изучение данного излучения актуально, поскольку радиационная поглощенная доза вблизи ускорителя значительно превышает предельно-допустимую. В связи с этим возникает необходимость дозиметрии и радиационной защиты, что в свою очередь приводит к важности изучения энергетического спектра вторичного рентгеновского излучения. Исследования были проведены методом моделирования с использованием программного пакета GEANT4. В результате исследования установлено, что спектр вторичного излучения слабо меняется в зависимости от положения относительно ускорителя. Энергетический диапазон составляет (0-400) кэВ. Средняя энергия рентгеновских гамма-квантов в пределах (120-140) кэВ. Также результаты исследования позволяют провести анализ об интенсивности вторичного рентгеновского излучения в зависимости от положения относительно объекта исследования.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, GEANT4, сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов.

SECONDARY X-RAY RADIATION FROM THE HIGH CURRENT REPETITIVELY-PULSED ACCELERANT CINUS-350

Research article

Afanasev K.¹, Gauzshtein V.^{2,*}, Rostov V.³, Sinyakov A.⁴, Tsigankov R.⁵²ORCID : 0000-0001-9072-0893;^{1, 2, 3, 4, 5}Institute of High-Current Electronics Sb RAS, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (gauzshtein[at]tpu.ru)

Abstract

In the presented work, a study of secondary X-ray radiation generated by a high current repetitively-pulsed electron accelerant CINUS-350 was carried out. The study of such radiation is relevant, because the radiation absorbed dose near the accelerant significantly exceeds the maximum permissible dose. This creates the need for dosimetry and radiation protection, which in turn leads to the importance of studying the energy spectrum of the secondary X-ray radiation. The research was carried out by simulation method using GEANT4 software package. As a result of the study, it was found that the spectrum of secondary radiation changes weakly depending on the position relative to the accelerant. The energy range is (0-400) keV. The average energy of X-ray gamma rays is within (120-140) keV. Also, the results of the study allow an analysis of the intensity of the secondary X-ray radiation depending on the position relative to the object of study.

Keywords: X-ray radiation, GEANT4, high current repetitively-pulsed electron accelerant.

Введение

Повышенный радиационный фон является одной из проблем при эксплуатации источников ионизирующих излучений. Особенно актуальна эта проблема там, где персонал вынужден находиться в непосредственной близости от работающей установки. Параметры радиационного фона зависят от типа установки, а также типа и энергии ускоряемых частиц. К таким установкам можно отнести источники СВЧ-излучения на основе сильноточного импульсно-периодического ускорителя электронов. Для генерации СВЧ-излучения ускоренные электроны проходят процедуру замедления, а затем утилизируются и становятся источником вторичного рентгеновского излучения.

Как правило, энергия ускорения в таких установках составляет несколько сотен кэВ. В связи с особенностями конструкции генератора, энергия отработанных электронов может значительно превышать энергию ускорения. Это, в свою очередь, способствует увеличению энергии вторичных гамма-квантов, проникающих за пределы генератора. Очевидно, что детальная информация о параметрах вторичного рентгеновского излучения необходима как для методов радиационной защиты, так и для дозиметрии. Например, выбор модели дозиметра сильно зависит от энергетического спектра гамма-квантов. Толщина защитного экрана напрямую зависит от верхней границы энергетического диапазона вторичных гамма-квантов. Получить информацию об энергетическом спектре можно двумя методами: прямыми измерениями энергетического спектра и расчетным путем. Первый метод требует наличия соответствующего гамма-спектрометра. Второй – точной модели, в которой учтены как геометрия и материалы установки, так и возможные процессы взаимодействия электронов и гамма-квантов с веществом. Такой метод стал осуществим после появления

инструментов для моделирования прохождения разного типа излучения с веществом. К настоящему времени наиболее удобным инструментом для такого рода задач является пакет GEANT4 [1].

В представленной работе проведено исследование вторичного рентгеновского излучения с применением GEANT4 для сильноточного импульсно-периодического ускорителя электронов СИНУС-350. Подробное описание этого генератора, а также принцип его работы приведено в работах [2], [4], [7], [9]. Основная задача данной работы – получение информации об энергетическом спектре вторичного рентгеновского излучения. Наиболее необходимые к получению результаты в нашем случае – это границы энергетического диапазона. Эта информация необходима для наиболее точной дозиметрии исследуемого объекта.

Методы и принципы исследования

Для решения поставленной задачи мы использовали модель, созданную с применением пакета GEANT4. Подробное описание этой модели можно найти в работе [10]. Данная модель достаточно точно учитывает технические особенности генератора и хорошо проявила себя при расчете радиационных доз на расстоянии до двух метров от ускорителя. Как показано в работе [10], результаты расчетов и измерения доз отличаются не более, чем на 15%. При этом, результаты моделирования адекватно описывают зависимость полученной дозы от координат. На рисунке 1 представлена модель исследуемого генератора. Слева – общий вид и положение системы координат. Справа детально показана та часть установки, в которой происходит ускорение и утилизация электронов. Упрощенно, схема генерации СВЧ излучения выглядит следующим образом: электроны проходят процедуру ускорения между катодом и замедляющей структурой (ЗС), далее проходят через ЗС для генерации СВЧ, оставляя часть энергии, и затем осаживаются на коллекторе. Материалом, из которого изготовлен коллектор, является углерод. Отметим, что применение карбонового коллектора позволяет значительно увеличить поглощение электронов и, тем самым, значительно снизить интенсивность вторичных рентгеновских гамма-квантов.

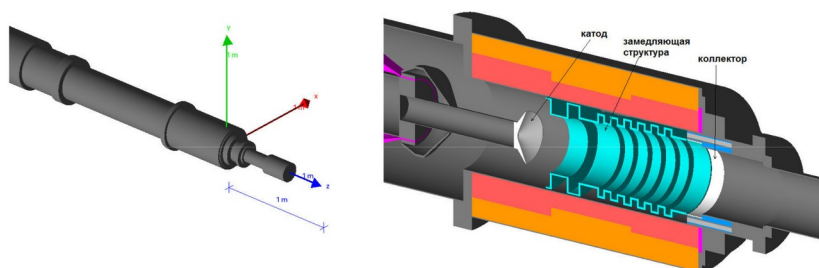


Рисунок 1 - Модель установки СИНУС-350
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.61.1>

Поскольку целью работы является исследование вторичного рентгеновского излучения, то мы моделировали только утилизацию электронов на внутренней стенке ускорителя. Большая часть электронов утилизируется на коллекторе (примерно 87%), остальные высаживаются на внутренней стенке замедляющей структуры. Несмотря на то, что ускоряющее напряжение составляет 400 кВ, среди электронов находится примесь с энергиями до 840 кэВ. Это объясняется индивидуальными особенностями установки, в частности, относительно небольшой длиной замедляющей структуры. Более подробную информацию о начальных параметрах электронов можно найти в работе [10].

Основные результаты

Результаты моделирования энергетического спектра вторичного рентгеновского излучения показаны на рисунке 2. Как видно, результаты приведены для разных координат x и z в плоскости XOZ ($y=0$). Все графики нормированы на одинаковое число утилизированных электронов, или, другими словами, на одно время работы ускорителя. Это сделано для того, чтобы показать, как меняется интенсивность облучения рентгеновскими гамма-квантами в зависимости от расстояния от ускорителя. Из приведенных результатов видно, что энергетический спектр гамма-квантов меняется очень слабо в зависимости от положения относительно ускорителя, диапазон изменения энергии лежит в пределах (0-400) кэВ. Средняя энергия гамма-квантов меняется в пределах (120-140) кэВ. Также четко прослеживается зависимость количества гамма-квантов от расстояния до ускорителя. Для $z>0$ количество гамма-квантов заметно уменьшается с увеличением расстояния от ускорителя. Для $z=-1$ м – слабо меняется. Это можно объяснить следующим: вторичное гамма-излучение имеет выраженное направление в сторону оси z , поскольку электроны перед утилизацией движутся преимущественно в этом направлении. Конечно, угол падения электронов к внутренней стенке ускорителя зависит от различных модельных неопределённостей, которые связаны с индивидуальной конструкцией ускорителя. В используемой модели угол падения распределен равномерно в диапазоне (10-90) градусов. Средний угол падения электронов к внутренней стенке ускорителя составляет 40 градусов. Также область $z<0$ частично экранируется самим ускорителем.

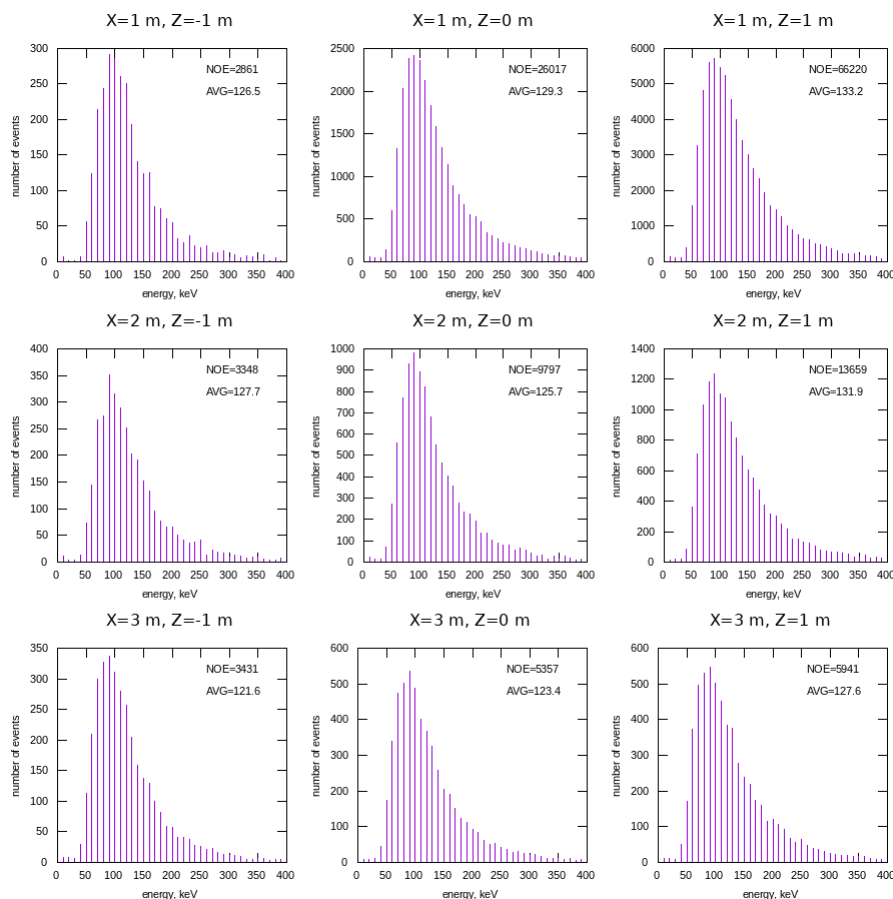


Рисунок 2 - Результаты моделирования энергетического спектра вторичных гамма-квантов для разных положений относительно ускорителя

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.61.2>

Заключение

Проведено исследование вторичного рентгеновского излучения для сильноточного импульсно-периодического ускорителя источника СИЛУС-350. Для получения результатов использована модель, разработанная с применением пакета GEANT4. Результаты моделирования энергетического спектра вторичного рентгеновского излучения приведены для разных положений относительно исследуемой установки, на расстоянии от одного до трёх метров. Показано, что форма спектра слабо меняется в зависимости от положения относительно ускорителя, энергетический диапазон гамма-квантов составляет (0-400) кэВ. Средняя энергия гамма-квантов лежит в пределах (120-140) кэВ и уменьшается с увеличением расстояния до ускорителя.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для дозиметрии генератора СИЛУС-350 можно использовать дозиметр с одинаковой чувствительностью по энергии гамма-квантов до 400 кэВ. По таким параметрам хорошо подходят дозиметры семейства Argow-Tech 138.

В заключении следует отметить, что используемый в работе подход с применением программного пакета GEANT4 полностью себя оправдал. Разработанная модель позволяет получать информацию как об энергетическом спектре вторичного рентгеновского излучения, так и об его относительной интенсивности.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства Высшего Образования и Науки, проект № FWRM-2021-0002

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No FWRM-2021-0002)

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Agostinelli S. Geant4 - a simulation toolkit. / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako // Nucl. Inst. Meth. A. – 2003. – 506. – p. 250–303. – DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8
2. Rostov V. Review of experiments on microwave beam steering in arrays of high-power oscillators by the control of voltage rise time. / V. Rostov, I. Romanchenko, A. Gunin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – № 46. – p. 3640–3647. – DOI: 10.1109/TPS.2018.2810824
3. Rostov V. High-voltage drivers based on forming lines with extended quasi-rectangular pulses for high-power microwave oscillators. / V. Rostov, A. Stepchenko, P. Vykhodsev et al. // Electronics. – 2022. – № 11. – p. 406–415. – DOI: 10.3390/electronics11030406
4. Rostov V. High-efficiency relativistic generators of nanosecond pulses in the millimeter-wavelength range. / V. Rostov, R. Tsygankov, A. Stepchenko // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2019. – № 62. – p. 467–471. – DOI: 10.1007/s11141-020-09992-0
5. Rostov V. Stable operation of a repetitively pulsed x-band relativistic backward wave oscillator. / V. Rostov, R. Tsygankov, P. Vykhodsev et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2021. – № 42. – p. 935–938. – DOI: 10.1109/LED.2021.3070887
6. Totmeninov E. Generation of a sequence of powerful ultrashort microwave pulses based on the effect of superradiance of a relativistic backward-wave oscillator with reflectors at the ends of the interaction space. / E. Totmeninov, V. Rostov // Technical Physics Letters. – 2021. – № 47. – p. 46–49. – DOI: 10.1134/S1063785021010119
7. Rostov V.V. High-Current Pulsed-Repetitive Electron Accelerator “Sinus-320”: Formation and Diagnostics of a Wide-Aperture Beam. / V.V. Rostov, V.V. Barmin, V.F. Landl et al. // Russian Physics Journal. – 2019. – № 62. – p. 1253–1259. – DOI: 10.1007/s11182-019-01842-5
8. Tot'meninov E.M. Generation of Microwave Pulses with a Carrier Frequency of 3.8 GHz and a Length of 75 ns by a Relativistic Cherenkov Microwave Oscillator without a Guiding Magnetic Field. / E.M. Tot'meninov, A.S. Stepchenko, V.V. Rostov et al. // Technical Physics volume. – 2018. – № 63. – p. 581–584. – DOI: 10.1134/S1063784218040254
9. Rostov V.V. Relativistic Ka-band backward-wave oscillators with stable phase. / V.V. Rostov, A.V. Gunin, I.V. Romanchenko et al. // Physics of Plasmas. – 2017. – № 24. – DOI: 10.1063/1.4989706
10. Afanasiev K. Radiation dose simulation for high-current repetitively pulsed electron accelerator. / K. Afanasiev, V. Gauzshtein, V. Rostov et al. // Radiation Physics and Chemistry. – 2022. – № 195. – p. 110059. – DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110059